アルミナセラミックス・グリーンシートに導入された 切欠き先端近傍の弾塑性応力解析

大原 秀 晴・横 堀 寿 光・野 尻 啓 市・内 藤 紳 司*

(東北大学 工学部 機械工学第Ⅱ学科)
(* (株)日立製作所エネルギー研究所)

グリーンシート状態にて、アルミナセラミックス IC 基板寸法に導入された切欠き先端近傍の弾塑性応力解析を行った。その結果、材料定数 H/E (H :加工硬化係数, E :ヤング率) が小さいと、切欠き延長方向の弾塑性境界に顕著な引っ張り・圧縮 2 軸応力状態が得られ、かつ切欠き導入に寄与する主剪断応力の寄与が減じ、引っ張り・圧縮 2 軸応力場の影響で、切欠き先端延長方向に微視き裂が発生する可能性が生じることが分った。また圧縮応力をうける切欠き底近傍に生ずる塑性域面積 S は、物性定数 H/E と負荷応力 σ_L/E の関数として次式で表されることが分った。

$$S \text{ mm}^2 = (1.98 \times 10^{-2}) (H/E)^{-0.3} (\sigma_L/E)^{2.22} \quad (1984 \text{ 年 } 6 \text{ 月 } 18 \text{ 日 受 付})$$

Elasto-Plastic Analysis near the Notch Introduced to the Alumina Ceramic Green Sheet

Hideharu OHARA, Toshimitsu YOKOBORI, Keiichi NOJIRI and Shinji NAITOH*

(Department of Mechanical Engineering II, Tohoku University)
(Aza-aoba, Aramaki, Sendai-shi 980)
(* Energy Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

Elasto-plastic finite element analysis is carried out to clarify the mechanism of the microcrack initiation when a notch is introduced in an alumina green sheet, in order to break down an IC plate after sintered with the dimension designed. Microcrack initiation depends on the material constant H/E , where H is work hardening coefficient, and E is Young's modulus. When H/E value is small, remarkable tension-compression multi-axial stress field is caused at the elasto-plastic boundary region in front of the notch tip, and the singularity of principal shearing stress becomes not so remarkable. Therefore, the effect of principal shear stress becomes small and the probability of microcrack initiation ahead the notch tip becomes large due to tension-compression multi-axial stress field. Plastic area near the notch tip is expressed as a function of material constant H/E and applied stress σ_L/E as follows :

$$S \text{ mm}^2 = (1.98 \times 10^{-2}) (H/E)^{-0.3} (\sigma_L/E)^{2.22} \quad [\text{Received June 18, 1984}]$$

Key-words : IC plate, Alumina green sheet, Work hardening coefficient, Multiaxial stress field, Elasto-plastic boundary region, Microcrack initiation, Stress intensity factor

1. 緒 言

アルミナ製 IC 基板はグリーン・シートにプレス成形後焼結を行って作るが、この際シートに切欠きをあらかじめ入れておき、使用に際しては指先でこの切欠きに沿って所定寸法の小板に割って用いる¹⁾。

ところが、この切欠きを入れるに当たって切欠きの形状・深さ、したがってプレス圧力によってはグリーン・シートのうちに既に図 1 に示すように切欠き先端に割れが発生し、またときには焼成に際してシートが割れたり、あるいは使用先での、ちょっとしたショックで割れを起

Fig. 1. Microcrack initiation when notch is introduced in alumina plate under the state of green sheet.

こすことがある²⁾。

これを防止しその原因を究明するために、切欠き導入時の応力分布及びこれとグリーン・シートの材料特性との関係について研究した。

2. 解 析

材料定数としては表1の値を用いた。圧縮応力-ひずみ曲線が得られていないので、図2に示す28°Cのグリーン・シートの引っ張り応力-ひずみ曲線²⁾で圧縮応力-ひずみ曲線を代用した。物性定数の影響を調べるために $H/E=0, 1/20, 1/10, 1/5, 1/2$ の五つの場合について解析を行った。ここに H, E は(1)式に示される加工硬化係数とヤング率である。解析は図2の応力-ひずみ線図が弾性域と降伏域とに分れるので、これを(1)式で近似して行った。弾塑性解析は負荷応力 σ_t

Fig. 2. Tensile stress-strain relation of alumina green sheet at 28°C.

Table 1. Material constant.

Young's modulus E	5.0 kg/mm ²
Poisson's ratio ν	0.4
Yield stress σ_Y	0.3 kg/mm ²

を漸次増加させていき、各要素について(2)式の相当応力 $\bar{\sigma}$ が降伏応力 σ_Y に達したとき、その要素を降伏要素として弾性応力-ひずみマトリックスを塑性応力-ひずみマトリックスに順次置き換えて平面歪場問題として解析した。

$$\sigma = E\epsilon_e + H\epsilon_p \quad (1)$$

ϵ_e : 弾性ひずみ, ϵ_p : 塑性ひずみ

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{2} \{ (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + b(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) \} \quad (2)$$

本解析は山田らによる有限要素法弾塑性応力解析プログラム³⁾を使用した。

3. モ デ ル

グリーン・シートへの切欠き導入は図3に示すくさび形の刃によって表面から切断されて行われ、そのために切欠き近傍の材料の変化はあまりなく、切欠き先端の延長方向には一様の圧縮応力の働く状態となる。したがって図3に示す圧縮問題を、解析を容易にするために近似的に図4に示す切欠き底の圧縮問題として解析した。要素分割図を図5に示す。切欠き深さ a は $a=0.1$ mm の一定とし、板厚 t を $t=0.65$ mm, 0.4 mm に変えることにより $a/t=0.15, 0.25$ についての解析を行った。

Fig. 3. Compressive working into green sheet.

Fig. 4. The model in the analysis.

Fig. 5. (a) Finite element mesh, (b) Detail part of A.

$a/t=0.15$ のときには要素数 292, 節点数 169, $a/t=0.25$ に対しては要素数 231, 節点数 135 とした. また要素最小寸法 Δa は $\Delta a/a=0.0625$ である.

4. 解析結果

4.1 圧縮応力下での切欠き底近傍の弾塑性応力解析

図 6 は荷重を逐次増加させ、要素を次々と降伏させて

Fig. 6. Stress distribution ahead of the notch tip under each plastic deformation stage.

- (a) The maximum principal stress,
- (b) The minimum principal stress,
- (c) The principal shearing stress

Fig. 7. Tension-compression multi axial stress field ahead of the notch tip.

Fig. 8. The principal tensile and shearing stress distribution ahead of the notch tip under the specific plastic deformation stage.

いったときの $H/E=1/10$ における切欠き延長線上に沿う弾塑性最大・最小主応力及び主剪断応力分布を示したものである。図中の数字は荷重を増加させることに対応して各要素が次々と塑性変形を起こしていった各塑性変形段階数である。図 6 (a) より切欠き先端前方にて最大主応力 σ_1 は極大値 σ_{1max} を有する応力分布となり、図 6 (a), (b) よりこの位置では図 7 に示すような水平方向に引っ張り最大主応力 σ_1 、鉛直方向に圧縮主応力 σ_2 が作用している。また図 6 (c) の主剪断応力は試料の切断に寄与する応力であり、この応力の特異性が大きいほど試料は鋭利に切断される。また図 6 から分るように荷重が増加して塑性変形段階が進むにつれて σ_{1max} , σ_2 の絶対値は増加し、 σ_1 が最大となる位置 $(r/W)\sigma_{1max}$ も増加して切欠き先端より離れていく。図 8 から分るように $(r/W)\sigma_{1max}$ は τ の r/W に対するこう配の変化する点に対応し、これは図 15 に示す切欠き先端近傍にできる塑性領域と弾性領域の境界に対応している。

4.2 切欠き底近傍弾塑性応力分布に及ぼす物性定数の影響

図 9 (a), (b), (c) は $H/E=1/2, 1/10, 0$ につい

(a)

(b)

(c)

Fig. 9. The effect of material constant H/E on the stress distribution along the notch tip direction.

(a) The maximum principal stress,
(b) The minimum principal stress,
(c) The principal shearing stress

Fig. 10. The effect of H/E on the $\sigma_{1\max}$ and $(r/W)\sigma_{1\max}$ relation.

Fig. 11. The effect of H/E on the $\sigma_{1\max}$ and σ_L relation

(a)

(b)

Fig. 12. The value of $\sigma_{1\max}$ for slit length ratio $a/t = 0.15$ and 0.25 .

での最大・最小主応力 σ_1 , σ_2 及び主剪断応力 τ の切欠き先端延長方向の応力分布を負荷応力 σ_L にて無次元化して示したものである。本結果より H/E が小さいほど最大・最小主応力 σ_1 , $-\sigma_2$ の絶対値は大きく、 τ の r/W の応力こう配がゆるやかになることが分る。図 10 は最大主応力 σ_1 の極大値 $\sigma_{1\max}$ とその極大となる位置 $(r/W)\sigma_{1\max}$ との関係を示したものである。図 11 は $\sigma_{1\max}$ と負荷応力 σ_L との関係を示したものである。本結果より $(r/W)\sigma_{1\max}$ は負荷応力の増加とともに切欠き先端から離れていき、かつ $\sigma_{1\max}$ の絶対値は増加していくことが分る。また H/E 値に大きく依存し、 H/E 値が小さくなると、 $\sigma_{1\max}$ は大きな値をとることが分る。

図 12 は本モデルにおいて、スリット侵入率を $a/t = 0.15$ と 0.25 について $\sigma_{1\max}$ と負荷応力との関係を示したものである。本結果より幾何学的なスリット長さの影響は $\sigma_{1\max}$ 値に対してはあまり大きくないことが分る。

4.3 切欠き底近傍の塑性域面積に及ぼす物性定数の影響

図 13 は圧縮応力を受ける切欠き底の近傍に生じる塑性域の面積 S を、負荷応力をヤング率にて無次元化した σ_L/E に対して解析した結果である。本結果より塑性域面積 S は H/E が小さくなるほど同一の負荷応力 σ_L/E に対して大きくなることが分る。図 14 は S と

Fig. 13. The relation of plastic area S and applied stress σ_L/E for various value of H/E .

Fig. 14. The relation of plastic area S and material constant H/E under the constant stress.

▲ plastic zone

Fig. 15. Plastic deformation behaviour ($H/E=1/10$)

H/E の関係を σ_L/E をパラメーターとして求めた結果である。本結果より塑性域面積は(3)式のように表され、 H/E 値が小さくなるほど大きくなることが分る。

$$S \text{ mm}^2 = (1.98 \times 10^{-2}) (H/E)^{-0.3} (\sigma_L/E)^{2.22} \quad (3)$$

図 15 は、圧縮応力増加に伴う塑性域の成長挙動を示したものである。

4.4 主応力線、主剪断応力線と物性定数の影響

図 16, 図 17, 図 18 は最大・最小主応力及び主剪断応力の等分布曲線を塑性変形段階 Stage 10, Stage 80 について、各 H/E 値について示したものである。図 18 における $H/E=0$, Stage 80 の斜線部は塑性域で加工硬化しないためすべて同じ応力値になっていることを示す。本結果より H/E が小さいほど最大主応力 σ_1 の変化が著しく、主剪断応力 τ の変化が少なくなることが分る。

5. 考 察

4 章の解析で示したように、材料の H/E 値が小さいと剪断応力の特異性が小さくなるばかりでなく図 8 に示すような切欠き先端延長方向の引っ張り・圧縮 2 軸応力状態が顕著に現れる。この応力場がプレスによる切欠き加工時に、図 1 に示す切欠き延長方向のき裂が発生する

Fig. 16. The maximum principal stress contour line.

Fig. 17. The minimum principal stress contour line.

ことの主たる原因の一つと考えられる。このことは、 $\sigma_1 = \sigma_{1\max}$ が弾塑性境界に生じることから $\sigma_1 = \sigma_{1\max}$ に最近接する弾性要素について、次のように考察することによっても明らかとなる。

(4) 式を定義する。

$$F = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_1 - \nu\sigma_2}{\varepsilon_c E} \quad (4)$$

σ_1 : 引っ張り主応力, σ_2 : 圧縮主応力,

E : ヤング率, ε_c : 引っ張り破断ひずみ,

ε_t : 任意の負荷応力条件のもとで生ずる水平方向引っ張りひずみ

$F=1$ のとき破断することから $F=\alpha \leq 1$ なるある定数値にて、き裂の発生が考えられ、 $\sigma_1, -\sigma_2 > 0$ の絶対値が大きいほど F が大きくなり、き裂が発生しやすくなる。すなわち H/E 値が小さければ $\sigma_1, -\sigma_2 > 0$ の絶対値が両者とも大きくなることから F 値が大きくなり、き裂が発生しやすくなる。したがってプレスによる切欠き導入を材料に損傷を与えることなく行うには、材料の持つ物性の必要条件として H/E 値をできるだけ 1 に近い値に

Fig. 18. The principal shearing stress contour line.

して引っ張り・圧縮 2 軸応力状態を緩和するとともに主剪断応力の特異性を大きくすることが考えられる。

著者の一人らによる圧縮応力を受けるスリット材の有限要素法による弾塑性応力解析及び実験的研究から、 H/E 値が小さい PMMA 材においては局所的に引っ張り応力が生じることにより引っ張り型破断を起こし、 H/E 値が 1 に近いプラスチック材においてはすべり変形を生じること示した^{4), 5)}。これらの結果及び本論文の結果から、圧縮問題においては材料定数 H/E 値が大きく影響を及ぼし、この値によってき裂の発生、破断様式が著しく異なってくることが考えられる。

6. 結 論

圧縮応力を受ける切欠き部の弾塑性応力解析を行った結果、次の結論を得た。

- 1) 材料定数 H/E 値が小さいとき、切欠き延長方向の弾塑性境界領域に顕著な引っ張り・圧縮 2 軸応力状態が得られ、主剪断力の特異性がゆるやかになる。
- 2) この結果、プレスによる切欠き導入時の主剪断応

力の寄与が減じ、かつ切欠き延長方向にき裂が発生する可能性を生じる。

- 3) 材料に損傷を与えることなくプレスにより切欠きを導入するために材料の物性として具備すべき性質としては、 H/E 値をできるだけ 1 に近づけて引っ張り・圧縮 2 軸応力状態を緩和させ、主剪断応力 τ の応力こう配を大きくすることが考えられる。
- 4) 切欠き底に圧縮応力が負荷されたときの塑性域面積 S は H/E , σ_t/E の関数として次式で表される。

$$S \text{ mm}^2 = (1.98 \times 10^{-2}) (H/E)^{-0.3} (\sigma_t/E)^{2.22}$$

謝 辞 最後に、本研究に終始御助言、御助力頂いた、(株)日立化成工業茨城研究所・石井 満氏に謝意を表する。

文 献

- 1) Hitachi Chemical Data Sheet, DATA No. C-01-2 (1979, 7).
- 2) 石井 満, private letter.
- 3) 山田嘉昭, “塑性・粘弾性コンピューターによる構造工学講座, II-2-A”, 培風館 (1972).
- 4) 金 宗哲, 横堀寿光, 横堀武夫, 西 宏, 前川一郎, 材料, 32, No. 356, 516 (1983)
- 5) 金 宗哲, 横堀武夫, 前川一郎, 横堀寿光, 小林良二, 日本材料強度学会誌, 17, 1 (1982).